第46卷　第12期
2023年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46　No. 12
Dec. 2023

基于PSR模型的新疆水资源经济生态韧性时空差异及影响因素分析

孙　宇，刘维忠，盛　洋

（新疆农业大学经济管理学院，新疆 乌鲁木齐　830052）

摘　要： 以新疆干旱区14个地州为例，基于压力-状态-响应（PSR）模型构建评价指标体系，运用熵权法计算指标权重，采用综合评价法和核密度分析14个地州压力-状态-响应韧性的时空分布特征，借助地理探测器对新疆水资源经济生态韧性的主要影响因子及因子交互作用进行探测。结果表明：（1）2010—2020年新疆各地州压力韧性评价指数多数呈现下降的趋势，其中克孜勒苏柯尔克孜自治州的压力韧性水平由高度韧性降为中等韧性。状态韧性、响应韧性、综合韧性均呈现不断增强的趋势，韧性水平也有所提升。（2）2010—2020年新疆各地州压力-状态-响应韧性核密度空间上呈现高低交错分布的格局，且西南部高于东北部。从3个维度来看，压力韧性核密度高值区由西南部向中部蔓延，分布较集聚；状态韧性和响应韧性核密度高值区由北部向南部蔓延，分布较分散。2020年，区域内综合韧性、状态韧性、响应韧性核密度差异呈不断缩小的趋势，压力韧性核密度空间差异较显著。（3）产业结构、人均GDP、生态自净能力影响因子对水资源经济生态韧性的影响力有所增强，人为灾害等因素有所减弱。产业结构、生态自净能力、社会消费品零售额等影响因子的交互作用强于单因素对系统韧性的影响力，各影响因子两两之间的交互作用中非线性增强关系数量大于双因子增强数量。

关 键 词： PSR模型；核密度；地理探测法；新疆

文章编号： 1000－6060(2023)12－2017－12(2017～2028)

随着经济的迅速发展，水资源短缺危机、生态污染严重等问题频繁出现，对水资源、经济、生态系统可持续性发展带来了挑战。自然环境是经济发展的基础，经济对水资源的需求是经济得以持续发展的前提。但与此同时，系统内部正遭受内外部风险的扰动和冲击，一方面是干旱、地震等自然灾害；另一方面是由人类粗放的经营发展模式带来的生态和水系统失衡的人为灾害。面对经济发展过程中产生的污染物对环境破坏和水资源供需失衡的压力，区域水资源、经济、生态系统亟需提高其韧性，从而限制系统脆弱性并促进长期可持续性。在此背景下，研究水资源、经济和生态韧性间相互影响显得尤为重要，为实现三者韧性的协调发展提供理论依据和实证支撑。

国内外学者关于水资源经济生态系统韧性的研究成果颇多，在研究角度方面，赵志龙等[1]基于二级模糊综合评价法分析了郑州市水资源系统韧性水平；刘金宁等[2]以水旱灾害为背景，分析了青岛市供水系统韧性水平；袁丰等[3]分析了长江经济带经济系统的抵抗力和恢复力；马文林等[4]以海绵城市、社区和生态系统适应为理论基础，评估了生态系统气候韧性水平。在评价指标方面，唐莹等[5]从抵抗风险能力、适应调整能力、创新转型能力3个维度构建了农业经济韧性的指标体系；陶洁怡等[6]从抵抗

收稿日期： 2023-04-07；　**修订日期：** 2023-05-25
基金项目： 国家社会科学基金项目（18BJY166）资助
作者简介： 孙宇（2000-），女，硕士研究生，主要从事农林经济管理研究. E-mail: 1148614510@qq.com
通讯作者： 刘维忠（1962-），男，博士，教授，主要从事农业经济管理研究. E-mail: 2080054388@qq.com

力、恢复力、适应力3个准则层，选取17个指标评价分析了长三角地区生态韧性；孙才志等[7]从经济因素、社会因素、资源环境因素3个方面，选取17个指标分析了中国区域水资源系统韧性。在研究方法方面，学者们采用空间马尔科夫链[8]、综合评价法[9]、层次分析法[10]、优劣解距离(TOPSIS)法[11]、变异系数[12]、熵值法[13]分析了城市韧性的时空演变特征。吕添贵等[14]运用STIRPAT模型分析了长三角地区生态韧性的影响因素；张明斗等[15]借助地理探测器分析了中国农业经济韧性的主要影响因子。

其一，目前学界从韧性视角出发，对水资源经济生态系统韧性关联分析处于初步探索阶段，并且韧性指标体系构建缺乏理论模型的支撑。其二，多系统韧性影响因素以及交互作用的实证研究不多。其三，新疆作为西北典型干旱区和生态脆弱区，研究新疆水资源经济生态韧性具有较强的现实意义。鉴于此，本研究借鉴压力-状态-响应(PSR)模型拆解系统应对扰动的全过程，建构水资源经济生态韧性指标体系，运用综合评价法和核密度分析各地州压力、状态、响应韧性的时空差异，应用地理探测器从时空角度对水资源经济生态韧性各驱动因素的影响程度进行解析，明确韧性的主要制约因素，以期为水资源经济生态韧性建设提供参考。

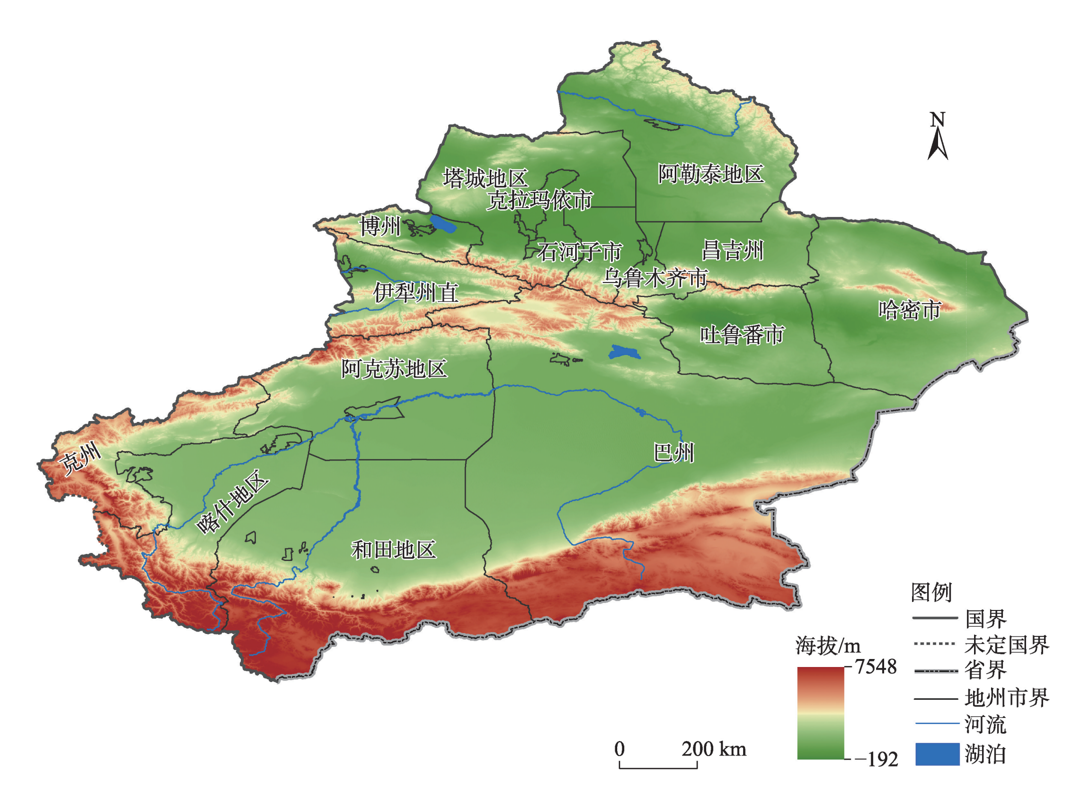
1 数据与方法

1.1 研究区概况

新疆(73°40′~96°18′E，34°25′~48°10′N)处于中国西北干旱区，总面积166×10^4 km^2，其辖区内有4个地级市、5个地区、5个自治州(图1)。该区具有典型的温带大陆性干旱气候特征，年均气温4~13 ℃，年均降水量89~208 mm。该区属于生态脆弱区，区域内水资源时空分布不均，南北差异较大，地表植被稀少，生态环境相对恶劣，荒漠化严峻，土地盐碱化严重。2020年，新疆GDP为1.38×10^{12}元，较2010年增长了0.09倍，第一产业和第二产业对经济增长的贡献率分别为18.0%和79.0%，远超过第三产业3%的经济贡献度。

1.2 数据来源

统计资料主要来源于新疆维吾尔自治区水利厅、新疆维吾尔自治区统计局等政府部门的数据，



注：该图基于新疆标准地图服务网站下载的审图号为新S(2021)047号的标准地图制作，底图边界无修改。克州为克孜勒苏柯尔克孜自治州；巴州为巴音郭楞蒙古自治州；伊犁州直为伊犁哈萨克自治州直属县市；博州为博尔塔拉蒙古自治州；昌吉州为昌吉回族自治州。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

以及《新疆统计年鉴（2011—2021年）》和《新疆水资源公报（2010—2020年）》及各地州市国民经济和社会发展统计公报和环境状况公报等，部分缺失数据通过线性插值法补充。

1.3 PSR模型语境下水资源经济生态韧性过程

PSR模型是由经济合作与发展组织和联合国环境规划署共同建立的概念模型，常用于研究环境问题的框架体系[16]。韧性即弹性、复原能力，本意指在物体受到外力时恢复到原来状态的能力。在这一过程中，当风险冲击时水资源系统、经济系统、生态系统通过物质、信息和能量的输入、输出交换以维持自身稳定再到恢复至正常运作水平，通过恢复力和适应力将危机转变为机遇，实现创新发展等的不同阶段[17]。基于上述理解，将韧性划分为扰动前、扰动中、扰动后3个阶段，分别对应于PSR模型中的压力-状态-响应这三大过程要素。因此，结合压力-状态-响应语境系统间的韧性运作过程拆分为：(1) 压力，指城市在发展过程中，内部与外部的双重灾害对生态环境造成压力，如干旱、地震、水污染、土壤污染、大气污染等威胁系统正常运行的灾害；(2) 状态，指城市运行过程中，各个子系统在压力冲击下状态的变化及相互耦合呈现出共同抵御压力的能力，如水资源总量、第一产业、第二产业、第三产业等；(3) 响应，指人为力量对城市中各个子系统主动进行干预和调控，使其恢复到平衡状态或者生成新的平衡，如政府管理能力与效率、污染治理投入、科技创新投入、环境监管等(图2)。

1.4 指标体系

基于PSR模型，水资源经济生态系统韧性需要从内外部双重灾害导致的压力、压力扰动中系统状态的改变及抵御力、扰动后系统应对灾害的恢复力与适应力3个维度筛选合适的评价指标，同时要结合指标选取的客观性、合理性、可行性原则[18]和相关学者的研究成果[19-24]及新疆的实际发展状况，以此构建水资源经济生态系统韧性的评价指标体系(表1)。压力韧性中选取8个指标衡量水资源经济生态系统所面临的自然灾害和人为灾害的威胁情况。状态韧性中选取9个指标评估水资源状态，选取7个指标评估经济状态，选取6个指标评估生态状态。响应韧性中选取7个指标评估水资源经济生态韧性的恢复能力，选取2个指标评估水资源经济生态韧性的适应能力。

1.5 研究方法

1.5.1 综合评价法 运用熵权法确定指标权重，相关计算公式参见文献[26]。运用综合评价法测度压力-状态-响应3个维度下水资源经济生态韧性评价

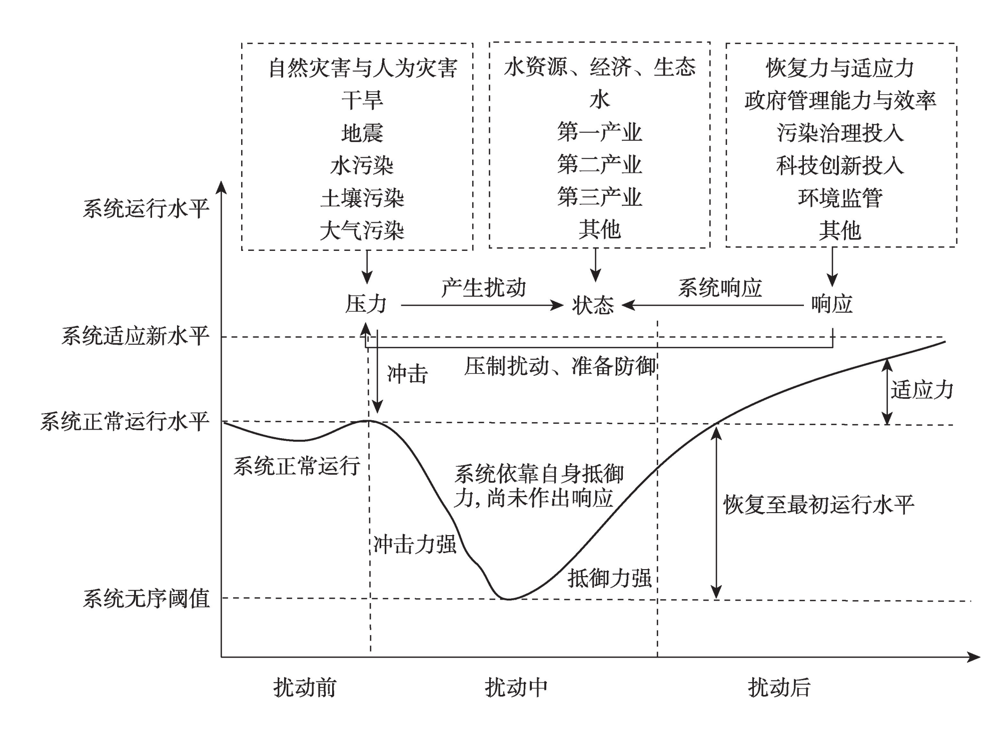


图2 压力-状态-响应(PSR)模型对水资源经济生态韧性过程解释示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PSR model for explaining the process of water resource economic ecological resilience

表1 基于PSR模型的水资源经济生态韧性指标体系构建

Tab. 1 Construction of economic and ecological resilience index system for water resources based on PSR model

目标层	准则层	要素层	指标层	权重
水资源经济生态系统韧性	压力韧性	自然灾害	降水量/mm	0.086
			城市近源地震等效等级	0.237
		人为灾害	工业废水排放量/10^8 t	0.072
			生活污水排放量/10^8 t	0.166
			工业SO_2排放量/mg·m^{-3}	0.131
			工业NO_2排放量/mg·m^{-3}	0.051
			工业固体废弃物生产量/10^4 t	0.122
			化肥施用强度/kg·hm^{-2}	0.136
	状态韧性	水资源状态	地表水/10^8 m^3	0.031
			地下水/10^8 m^3	0.026
			水资源总量/10^8 m^3	0.031
			产水模数/10^4 m^3·km^{-2}	0.029
			人均水资源量/m^3·人$^{-1}$	0.035
			农业用水占比/%	0.018
			工业用水占比/%	0.031
			人均用水量/m^3·人$^{-1}$	0.076
			供水量/10^8 m^3	0.040
		经济状态	第一产业占比/%	0.031
			第二产业占比/%	0.034
			第三产业占比/%	0.041
			人均GDP/10^4元·人$^{-1}$	0.024
			社会消费品零售额/10^4元	0.034
			进出口贸易总额/10^4 USD	0.086
			固定资产投资额/10^4元	0.051
		生态状态	湿地面积占比/%	0.126
			人均公园绿地面积/m^2·人$^{-1}$	0.069
			建成区绿化覆盖率/%	0.019
			森林覆盖率/%	0.021
			水土流失治理面积/km^2	0.076
			旱地面积占比/%	0.070
	响应韧性	恢复能力	万元GDP废水排放量/m^3·(10^4元)$^{-1}$	0.045
			环境治理投资/10^4元	0.062
			生态用水占比/%	0.103
			城市生活垃圾处理率/%	0.053
			城市污水处理率/%	0.076
			GDP增长率/%	0.108
			财政收入/10^4元	0.041
		适应能力	R&D经费支出占比/10^4元	0.077
			万人发明专利占有量/件	0.434

注:城市近源地震等效等级反映的是地震灾害危险度指数,将地震等效震级分为<4、4.0~4.5、4.5~5.0、5.0~5.5、5.5~6.0、6.0~6.5、6.5~7.0、7.0~7.5、7.0~8.0、>8.0共10个等级[25];为便于计算分别取其上限值作为指标值,未发生地震的地区取0.1为指标值。

指数[27],计算公式如下:

$$Y_i = \sum_{j=1}^{N} \omega_j x'_{ij}, \quad i = 1, 2, 3 \tag{1}$$

$$T_j = \alpha Y_1 + \beta Y_2 + \gamma Y_3 \tag{2}$$

式中:Y_1、Y_2、Y_3分别为压力、状态、响应韧性评价指数,取值范围为[0, 1];x'_{ij}为标准化后指标的数值;ω_j为各项指标权重;N为指标数量;T_j为压力-状态-响应综合韧性评价指数;α、β、γ为待定系数,$\alpha+\beta+\gamma=1$,由于3个系统同等重要,令$\alpha=\beta=\gamma=1/3$。参考相关研究成果[27],将韧性水平等级划

分为5个等级(表2)。

1.5.2 核密度估计 核密度估计法是一种统计非参数密度的估计方法,能够清晰地反映研究要素的空间分布密度[28]。基于此,本研究采用核密度估计的方法揭示新疆14个地州压力韧性、状态韧性、响应韧性以及综合韧性的空间分布特征及区域集聚规律,核密度的数值越高,表示韧性水平越高,计算公式如下:

$$f(x_i, y_i)=\frac{1}{nr}\sum_{i=1}^{n}k\left(\frac{d_i}{r}\right) \tag{3}$$

式中:$f\left(x_i, y_i\right)$为位于(x, y)位置的核密度值;k为核函数;r为搜索半径,即带宽;n为样本数量;d_i为估值点与(x_i, y_i)之间的点距离。

结合表2,将核密度估计后的韧性水平重新定义划分,如表3所示。

1.5.3 地理探测器模型 地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法,可以探测数值型数据,也可以探测定性数据[29]。因子探测:探测属性Y的空间分异性,以及探测某因子X多大程度上解释了属性Y的空间分异,用q值度量,取值区间为[0, 1],q值越大,表示X对Y的解释力越强,计算公式为:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{4}$$

式中:h=1, 2, …, L为变量Y(压力–状态–响应综合韧性)或因子X(影响因子)的分层,即分类或分区;N_h和N分别为层h和全区的单元数;σ^2_h和σ^2分别为层h和全区的Y值的方差。

交互作用探测:识别影响因子X1和X2之间的交互作用是否会增加或减弱对因变量Y的解释力,或这些影响因子对因变量的影响是相互独立的,主要比较$q(X)$、q(X1)+q(X2)和q(X1∩X2)之间的关系(表4)。

2　结果与分析

2.1　新疆压力–状态–响应韧性时空差异分析

2.1.1 时间差异分析 2010—2020年新疆各地州压力韧性指数大部分处于下降趋势(表5),小部分地区有所提升。克拉玛依市2010、2015、2020年压力韧性评价指数分别为0.212、0.248、0.842,2010—2020年压力韧性指数增长率为14.78%,主要原因是克拉玛依市是石油资源丰富的工业化城市,随着采油规模和炼油规模的不断扩大,工业固体废弃物排放量、化肥施用强度2个负向指标数据大幅上升,因此压力韧性指数迅速提升,进而对系统发展产生负向影响。克孜勒苏柯尔克孜自治州压力韧性指数由0.851(2010年)下降至0.486(2020年),压力韧性水平由高度韧性下滑至中等韧性,说明克孜勒苏柯尔克孜自治州的发展受人为灾害的冲击减弱,但降水量的骤减也会给克孜勒苏柯尔克孜自治州的发展施加压力。

2010—2020年新疆各地州状态韧性指数整体呈增长态势,部分地区增长幅度较明显。阿克苏地区2010年状态韧性指数为0.314,2020年状态韧性指数为0.673,增长幅度最大,韧性等级从较低韧性上升至较高韧性范围,表明阿克苏地区生态系统状态较优,其森林覆盖率、人均公园绿地面积、水土流失治理面积较高,生态状态不容易被外界的干扰打破自身平衡状态,生态结构较稳定。另外,农业用水量、工业用水量、供水量较充足,说明阿克苏地区水资源状态较好,水资源利用程度和利用结构有利于提升水资源状态韧性水平。阿克苏地区人均GDP、固定资产投资额、进出口贸易总额、三产占比等指标稳步增加,提升了地区经济资本存量和经济

表2　韧性水平等级划分

Tab. 2　Classification of resilience levels

等级	低度韧性	较低韧性	中等韧性	较高韧性	高度韧性
评价值	[0.0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.8)	[0.8, 1.0]

表3　核密度估计后韧性水平等级

Tab. 3　Resilience level grade after kernel density estimation

等级	低度韧性	较低韧性	中等韧性	较高韧性	高度韧性
评价值	$[0.0, 0.2\times10^{-4})$	$[0.2\times10^{-4}, 0.4\times10^{-4})$	$[0.4\times10^{-4}, 0.6\times10^{-4})$	$[0.6\times10^{-4}, 0.8\times10^{-4})$	$[0.8\times10^{-4}, 1.0\times10^{-4}]$

表4 两个自变量对因变量的交互类型

Tab. 4 Types of interaction between two independent variables and the dependent variable

判断依据	交互作用
$q(X1∩X2)<\min[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\min[q(X1), q(X2)]<q(X1∩X2)<\max[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1∩X2)>\max[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1∩X2)=q(X1)+q(X2)$	独立
$q(X1∩X2)>q(X1)+q(X2)$	非线性增强

的效率与活力，也是水资源状态韧性和生态状态韧性增强的基础要素。

2010—2020年新疆各地州响应韧性指数上升幅度较大，说明各地州在应对压力冲击时做出积极主动的响应对策和措施，改变现状状态，使其能更好适应城市发展。乌鲁木齐市响应韧性指数由0.270（2010年）增长到0.946（2020年），增长率为13.35%，韧性水平由较低韧性水平跃升到高度韧性水平，说明在恢复能力子系统中，政府管理能力与效率较高、污染治理投入力度较大，反映出系统对环境治理的正反馈较强，从而有利于提升系统的响应韧性水平。另外，乌鲁木齐市为了加大其自身发展能力，对研究与开发的支出也较大，这使得适应能力也较强，使其从不平衡状态中尽快恢复，甚至提升到新的高水平平衡状态。

2010—2020年新疆各地州压力-状态-响应韧性指数呈上升态势。2020年综合韧性指数从大到小依次排序为：和田地区>伊犁哈萨克自治州直属县市>阿克苏地区>喀什地区>克孜勒苏柯尔克孜自治州>乌鲁木齐市>克拉玛依市>塔城地区>昌吉回族自治州>哈密市>博尔塔拉蒙古自治州>吐鲁番市>阿勒泰地区>巴音郭楞蒙古自治州，和田地区综合韧性指数位列第一，说明在自然灾害和人为灾害压力的冲击下，水资源状态、经济状态、生态状态的自身抵御力较强，加之政府、企业和居民对压力的响应，环境治理的大力投入和科技创新能力的提升，有利于恢复水资源经济生态系统的韧性水平。

2.1.2 空间差异分析 为了进一步分析新疆各地州韧性的空间差异，选取2010、2015、2020年截面数据，借助核密度分析新疆各地州压力-状态-响应韧性综合评价指数的空间分布，采用ArcGIS 10.2绘制出各地州韧性指数空间格局（图3）。其空间格局表现以下特征：

2010、2015、2020年各地州压力韧性核密度值取值范围依次为$0\sim0.435\times10^{-4}$、$0\sim0.418\times10^{-4}$、$0\sim0.450\times10^{-4}$，韧性水平处于中等韧性，说明部分地州三系统的发展受自然和人为灾害的冲击较强。2010年各地州压力韧性核密度的分布格局，总体呈西南密度高、东北密度低的特征，压力韧性高密度区主要位于克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区，说明上述区域干旱、水污染、土壤污染等灾害冲击力较

表5 新疆各地州压力-状态-响应韧性综合评价指数

Tab. 5 Comprehensive evaluation index of pressure-state-response resilience in various prefectures of Xinjiang

研究区域	压力韧性			状态韧性			响应韧性			压力-状态-响应综合韧性		
	2010年	2015年	2020年	2010年	2015年	2020年	2010年	2015年	2020年	2010年	2015年	2020年
乌鲁木齐市	0.123	0.338	0.242	0.224	0.512	0.579	0.270	0.658	0.946	0.205	0.502	0.589
克拉玛依市	0.212	0.248	0.842	0.381	0.363	0.274	0.432	0.476	0.406	0.342	0.362	0.507
吐鲁番市	0.369	0.753	0.185	0.309	0.429	0.378	0.132	0.385	0.754	0.270	0.523	0.439
哈密市	0.358	0.346	0.225	0.372	0.356	0.301	0.255	0.313	0.835	0.328	0.338	0.454
昌吉回族自治州	0.276	0.313	0.306	0.445	0.456	0.463	0.242	0.397	0.663	0.321	0.388	0.477
博尔塔拉蒙古自治州	0.393	0.248	0.188	0.305	0.288	0.506	0.290	0.512	0.659	0.329	0.349	0.451
巴音郭楞蒙古自治州	0.480	0.274	0.174	0.327	0.336	0.437	0.345	0.244	0.482	0.384	0.285	0.364
阿克苏地区	0.496	0.337	0.636	0.314	0.278	0.673	0.492	0.169	0.701	0.434	0.261	0.670
克孜勒苏柯尔克孜自治州	0.851	0.491	0.486	0.365	0.269	0.648	0.256	0.355	0.790	0.490	0.372	0.641
喀什地区	0.643	0.302	0.505	0.277	0.244	0.676	0.123	0.625	0.786	0.347	0.391	0.656
和田地区	0.472	0.658	0.795	0.352	0.335	0.655	0.189	0.407	0.918	0.337	0.467	0.789
伊犁哈萨克自治州直属县市	0.428	0.314	0.746	0.322	0.351	0.576	0.099	0.423	0.751	0.283	0.362	0.691
塔城地区	0.376	0.772	0.228	0.517	0.422	0.493	0.288	0.350	0.713	0.394	0.514	0.478
阿勒泰地区	0.459	0.116	0.200	0.374	0.550	0.575	0.326	0.316	0.536	0.386	0.327	0.437

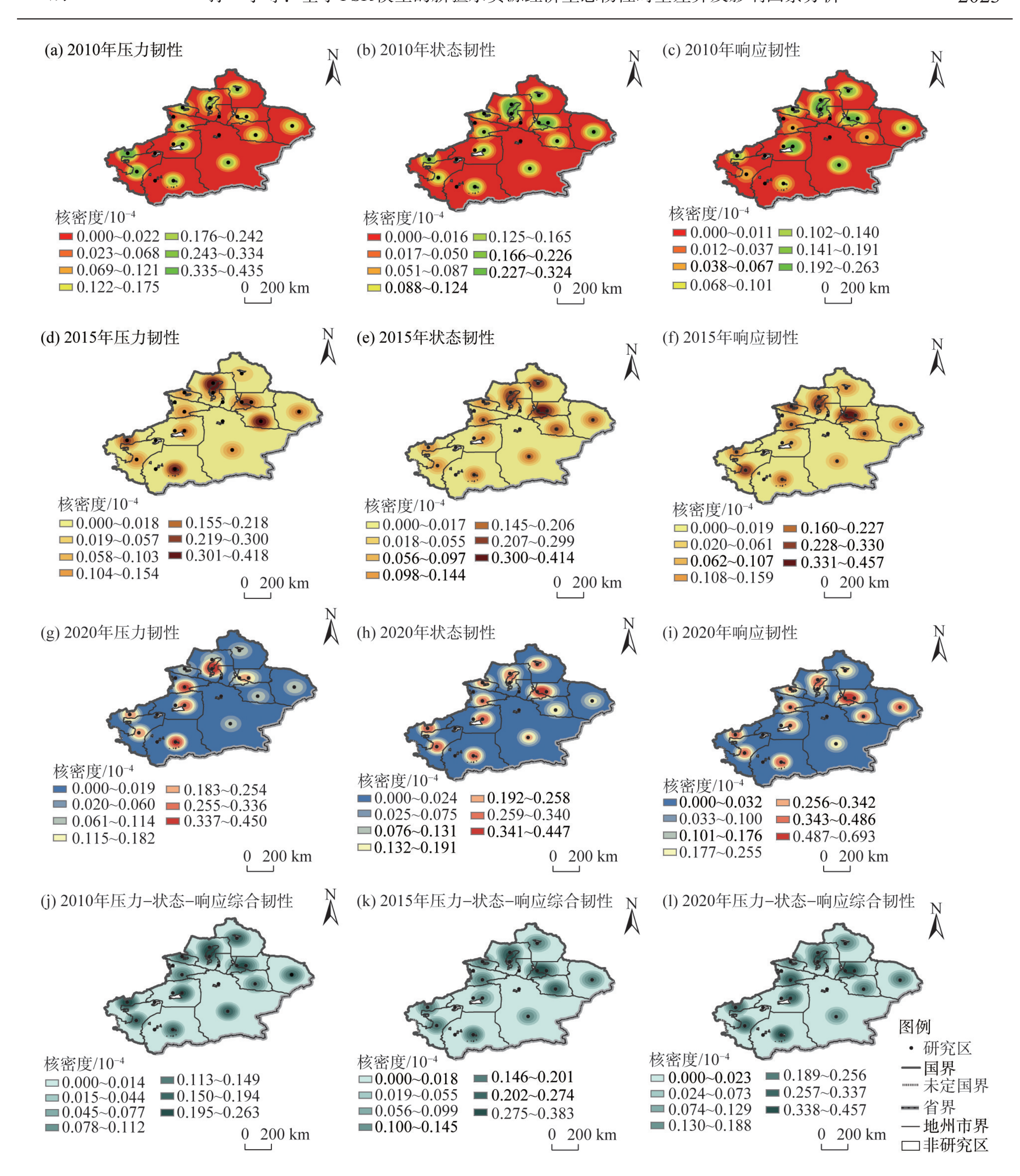


图3　新疆各地州压力-状态-响应韧性评价指数核密度空间分布

Fig. 3　Kernel density spatial distribution of pressure-state-response resilience evaluation index in various prefectures of Xinjiang

强，打破了水资源系统、经济系统、生态系统的固有平衡，使系统陷入紊乱。2015年压力韧性高密度区由西南部蔓延到东北部、塔城地区和吐鲁番市，该区域干旱少雨、环境效率低、污染排放量大，因此由低密度压力区发展为高密度压力区。2020年压力韧性高密度区向中部蔓延，高密度区集中在和田地区、伊犁哈萨克自治州直属县市、克拉玛依市，该区域干旱严峻、工业化发展迅速、工业污染严重，形成核密度高值区。

2010、2015、2020年新疆各地州状态韧性核密度值取值范围依次为0~0.324×10⁻⁴，0~0.414×10⁻⁴，0~0.447×10⁻⁴，韧性水平由较低韧性变动到中等韧性，

说明各地州系统抗干扰能力加强。2010年状态韧性核密度呈现东北高、西南低的分布特征，高密度区主要分布在塔城地区、克拉玛依市、昌吉回族自治州、阿勒泰地区，这些区域水资源和绿地资源充足，经济发展水平较高，这有利于抵御干扰的冲击。2015年状态韧性核密度高值区主要集中在东北部，其中昌吉回族自治州核密度最高，昌吉回族自治州的水资源条件相对其他地区较好，产业结构多样化，生态环境质量较高，自身净化污染和恢复能力较强。2020年各地州状态韧性核密度相比2015年有所提高，阿克苏地区、喀什地区、和田地区核密度范围由0.055×10^{-4}~0.299×10^{-4}（2015年）变化为0.191×10^{-4}~0.447×10^{-4}（2020年），说明状态韧性有所提升，抗冲击能力增强。

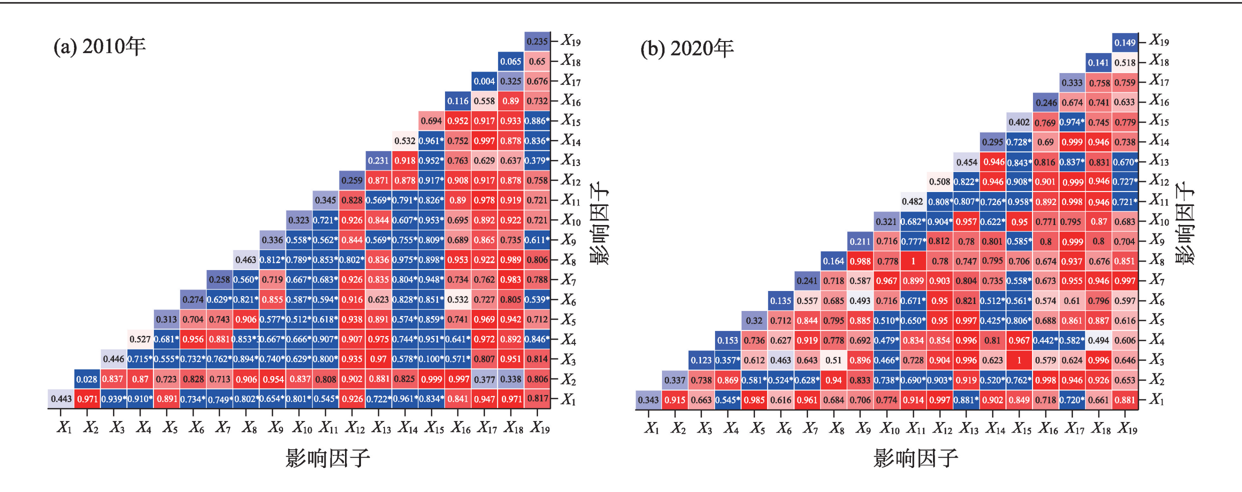
2010、2015、2020年各地州响应韧性核密度值取值范围依次为0~0.263×10^{-4}、0~0.457×10^{-4}、0~0.693×10^{-4}，韧性水平由较低韧性跃升到较高韧性，说明各地州恢复韧性运行水平能力加强。2010年响应韧性核密度分布格局，总体呈现中部高、南北低的特征，克拉玛依市、昌吉回族自治州响应韧性核密度处于高值区水平，阿克苏地区、巴音郭楞蒙古自治州、阿勒泰地区响应韧性核密度处于中值区水平，喀什地区、和田地区、吐鲁番市处于低值区水平，空间差异显著。2015年响应韧性高密度区分布较分散，塔城地区、克拉玛依市、昌吉回族自治州、乌鲁木齐市响应韧性核密度处于领先水平，克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、和田地区响应韧性核密度处于中等水平，哈密市、巴音郭楞蒙古自治州处于低等水平，但各地州相比2010年响应韧性核密度是有所提升，说明上述区域经济发展水平逐年增强，资源条件与环境质量也提高，有利于提升系统抗干扰能力。2020年响应韧性核密度空间格局呈东北高、西南低的分布，各地州响应韧性整体有所提高，克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区、和田地区呈现小幅增长趋势，说明污染治理的投入、科研创新能力的提升，促进系统受到干扰后的恢复力和适应力的提高，从而使系统韧性水平达到原始发展状态，甚至达到更高的适应运行水平。

2010、2015、2020年各地州压力–状态–响应综合韧性核密度值取值范围依次为0~0.263×10^{-4}、0~0.383×10^{-4}、0~0.457×10^{-4}，韧性水平由较低韧性变化为中等韧性，说明综合韧性整体有所提升。2010年克孜勒苏柯尔克孜自治州、塔城地区、克拉玛依市属于综合韧性核密度高值区，核密度空间分布由西南部向东北部减弱。2015年综合韧性核密度分布格局与2010年有所不同，呈现东北高、西南低的特征。2020年综合韧性高密度区分布较分散，处于高密度区的地区数量增加，说明政府、企业及居民对污染防治力度加强和环保意识的提高，有效增加了系统抵御压力冲击的能力，以及恢复常态运行水平的能力。

2.2 新疆压力–状态–响应韧性影响因素分析

2.2.1 *探测因子构建* 利用地理探测器因子探测模块，比较分析新疆各地州2010年和2020年压力、状态、响应韧性空间差异的影响因素。在已有研究基础上，遵循数据的科学性和可操作性原则，选取了19个代表性指标作为地理探测器分析的探测因子[23,30–31]。自然灾害即降水量(X_1)，可以调节土壤水分、温度，改善作物的生长条件，但降雨稀少会制约农业经济的发展；人为灾害主要指工业废水排放量(X_2)、工业SO_2排放量(X_3)、工业NO_2排放量(X_4)、工业固体废弃物生产量(X_5)、化肥施用强度(X_6)，污染物排放过量会导致水质、土壤、空气造成污染，打破生态系统固有的平衡状态；用水结构指农业用水占比(X_7)、工业用水占比(X_8)、生态用水占比(X_9)，合理的用水结构可以保障经济社会的可持续发展；产业结构反映各产业经济发展水平与活力，指标选取第一产业占比(X_{10})、第二产业占比(X_{11})、第三产业占比(X_{12})；人均GDP(X_{13})反映一个地区经济富裕程度和经济发展水平，人均GDP越高，代表这个地区的经济越发达，人民的生活水平也越高；社会消费品零售额(X_{14})反映消费需求对经济运行的影响程度，数值越高，说明消费需求越旺盛，进而刺激投资，增加产出，改善企业效益，提高居民收入；生态自净能力是指系统在不改变结转而实现环境自净，指标选取湿地面积(X_{15})、人均公园绿地面积(X_{16})、建成区绿化覆盖率(X_{17})；环境规制强度即环境治理投资(X_{18})，环境规制力度越强，有利于改善工农业的生产环境；科技创新能力即R&D经费支出(X_{19})，高水平科技创新可以推动传统农业优化，提高生产效率，并且节能环保技术的研发有效的降低了污染物的排放，维护了生态环境与经济发展的平衡。

2.2.2 *影响因子探测* 选取19个影响因子对水资源经济生态韧性的解释程度进行探测(图4)，q值越接



注：*表示双因子增强，未标注*表示非线性增强。X_1：降水量；X_2：工业废水排放量；X_3：工业SO_2排放量；X_4：工业NO_2排放量；X_5：工业固体废弃物生产量；X_6：化肥施用强度；X_7：农业用水占比；X_8：工业用水占比；X_9：生态用水占比；X_{10}：第一产业占比；X_{11}：第二产业占比；X_{12}：第三产业占比；X_{13}：人均GDP；X_{14}：社会消费品零售额；X_{15}：湿地面积；X_{16}：人均公园绿地面积；X_{17}：建成区绿化覆盖率；X_{18}：环境治理投资；X_{19}：R&D经费支出。

图4　2010年和2020年新疆水资源经济生态韧性影响因子交互探测结果

Fig. 4　Interaction detection results of ecological resilience impact factors of water resources economy in Xinjiang in 2010 and 2020

近1，说明解释力越强。2010年新疆三系统韧性主导因素的影响程度各不相同，q值从大到小依次排序为：$X_{15}>X_{14}>X_4>X_8>X_3>X_1>X_{11}>X_9>X_{10}>X_5>X_6>X_{12}>X_7>X_{19}>X_{13}>X_{16}>X_{18}>X_2>X_{17}$。其中，湿地面积、社会消费品零售额、工业$NO_2$排放量是新疆三系统韧性的主要影响因子。2020年新疆三系统韧性主导因素的影响程度q值从大到小依次排序为：$X_{12}>X_{11}>X_{13}>X_{15}>X_1>X_2>X_{17}>X_{10}>X_5>X_{14}>X_{16}>X_7>X_9>X_8>X_4>X_{19}>X_{18}>X_6>X_3$。第二产业占比、第三产业占比、人均GDP是新疆三系统韧性的主要影响因子。综上所述，2010—2020年，三系统韧性的主要影响因子明显变化，但q值变化不显著。其中，化肥施用强度、工业SO_2排放量的作用强度整体减弱，说明随着污染防治力度的加强，生态环境质量也随之提高。

2.2.3　*影响因子的交互探测*　对水资源经济生态韧性的19个影响因子进行了交互探测（图4），结果显示各影响因子两两之间主要为双因子增强和非线性增强的交互作用类型，非线性增强效果大于双因子增强。具体来看，2010年双因子增强类型中解释力最大的3对依次为：$X_1∩X_{14}$（0.961）、$X_8∩X_{14}$（0.975）、$X_{14}∩X_{15}$（0.961）。非线性增强类型中解释力最大的3对依次为：$X_2∩X_{15}$（0.999）、$X_2∩X_{16}$（0.997）、$X_{14}∩X_{17}$（0.997）。2020年，影响因素两两之间的交互类型中非线性增强关系数量大于双因子增强数量。其中，双因子增强类型中解释力最大的3对依次为：$X_{11}∩X_{15}$（0.958）、$X_{12}∩X_{15}$（0.908）、$X_{17}∩X_{15}$（0.974）。非线性增强类型中解释力最大的3对依次为：$X_8∩X_{11}$（1.000）、$X_3∩X_{15}$（1.000）、$X_9∩X_{17}$（0.999）。综上所述，产业结构、生态自净能力、社会消费品零售额等影响因子两两交互影响力强于单因素影响力，说明影响因子叠加作用可以增强对系统韧性的影响。因此，新疆在发展农业时要注重化肥污染的防治，发展绿色农业，在石油、煤矿开采和加工过程中，降低土壤污染和生态破坏，以低污染排放、低环境成本作为发展目标，提升生态系统的自净能力，实现资源、经济、生态的可持续发展。

3　讨　论

本文基于PSR模型对新疆水资源经济生态韧性时空差异及其影响因子展开研究。研究结果显示，储金龙等[12]、张明斗等[15]分别对城市韧性、农业经济韧性进行研究，却同时认为市场经济规模、社会消费品零售额对城市韧性或农业经济韧性的影响力较大，市场规模、科技投入水平是交互因素对中具有重要作用的因素之一，这一研究结果与本文的因子探测中得出占据主要影响因子的结论部分一致。张明斗等[15]从抵抗力和重构力2个维度，分析了中国农业经济韧性的时空差异，研究内容及研究维度是本文研究的一部分。吕添贵等[14]只是分析了长三角地区城市生态韧性的时空变化，并未对多系统韧性进行详细研究。上述文献中关于韧性指标体系的构建未引入理论模型作为支撑，相关学

者集中研究单系统韧性。

本文将PSR模型引入构建多系统韧性指标体系中,从多角度且相互联系的要素层加以定量化测度,比已往的主观评价方法相比更加科学和具体,更能表征韧性发挥的角度。运用核密度估计3种维度下多系统韧性评价指数,能够揭示多系统韧性评价指数的空间分布特征以及区域空间集聚规律。本研究仍存在不足之处:韧性是动态变化的,任一要素改变都会牵动整体发生变化,而本文仅考虑压力冲击下系统韧性的变化,并未量化冲击后各个要素变动造成的影响。因此,在未来需要对动态变化的韧性进行深入研究。

4 结 论

本文以新疆14个地州为研究区域,借助PSR模型建立水资源经济生态韧性指标体系。首先利用熵权法计算指标权重,借助综合评价法测算2010—2020年压力、状态、响应韧性综合评价指数,其次运用核密度估计法分析各地州压力韧性、状态韧性、响应韧性的空间差异,最后基于地理探测器对水资源经济生态韧性的影响因子进行有效识别。研究结论如下:

(1) 2010—2020年新疆各地州压力韧性评价指数多数呈现下降的趋势,其中克孜勒苏柯尔克孜自治州的压力韧性水平由高度韧性降为中等韧性。状态韧性、响应韧性、综合韧性均呈现不断增强的趋势,韧性水平也有所提升。

(2) 2010—2020年新疆各地州压力-状态-响应韧性核密度空间上呈现高低交错分布的格局,且西南部高于东北部。从3个维度来看,压力韧性核密度高值区由西南部向中部蔓延,分布较集聚;状态韧性和响应韧性核密度高值区由北部向南部蔓延,分布较分散。2020年,区域内综合韧性、状态韧性、响应韧性核密度差异呈不断缩小的趋势,压力韧性核密度空间差异较显著,各维度韧性水平有所增强。

(3) 产业结构、人均GDP、生态自净能力影响因子对水资源经济生态韧性的影响力有所增强,人为灾害等因素有所减弱。产业结构、生态自净能力、社会消费品零售额等影响因子的交互作用强于单因素对系统韧性的影响力,不同影响因子两两之间的交互作用中非线性增强关系数量大于双因子增强数量。

参考文献(References)

[1] 赵志龙, 杨亚锋, 徐冬梅, 等. 基于二级模糊综合评判法的水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水电能源科学, 2022, 40(10): 39-43. [Zhao Zhilong, Yang Yafeng, Xu Dongmei, et al. Resilience evaluation and regulation model of water resources system based on two-level fuzzy comprehensive evaluation and its application[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(10): 39-43.]

[2] 刘金宁, 王伟, 邵志国. 水旱灾害下青岛市供水系统韧性能力评估及提升[J]. 防灾科技学院学报, 2020, 22(4): 9-19. [Liu Jinning, Wang Wei, Shao Zhiguo. Resilience capacity assessment and promotion strategy of water supply system in Qingdao under flood and drought disasters[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2020, 22(4): 9-19.]

[3] 袁丰, 熊雪蕾, 徐紫腾, 等. 长江经济带经济韧性空间分异与驱动因素[J]. 地理科学进展, 2023, 42(2): 249-259. [Yuan Feng, Xiong Xuelei, Xu Ziteng, et al. Spatial differentiation and driving factors of economic resilience in the Yangtze River Economic Belt, China[J]. Progress in Geography, 2023, 42(2): 249-259.]

[4] 马文林, 郭丽平, 王海婷, 等. 社区生态系统气候韧性概念及评估研究[J]. 生态经济, 2023, 39(3): 177-183. [Ma Wenlin, Guo Liping, Wang Haiting, et al. Concept and assessment of climate resilience in community ecosystem[J]. Ecological Economy, 2023, 39(3): 177-183.]

[5] 唐莹, 陈梦涵. 农业基础设施对农业经济韧性的作用机制与效应研究[J]. 农林经济管理学报, 2023, 22(3): 292-300. [Tang Ying, Chen Menghan. Research on the mechanism and effect of agricultural infrastructure on agricultural economic resilience[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2023, 22(3): 292-300.]

[6] 陶洁怡, 董平, 陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1975-1987. [Tao Jieyi, Dong Ping, Lu Yuqi. Spatial-temporal analysis and influencing factors of ecological resilience in the Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(9): 1975-1987.]

[7] 孙才志, 孟程程. 中国区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2094-2104. [Sun Caizhi, Meng Chengcheng. Evaluation of the development coordination relationship between resilience and efficiency of regional water resources system in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2094-2104.]

[8] 方叶林, 王秋月, 黄震方, 等. 中国旅游经济韧性的时空演化及影响机理研究[J]. 地理科学进展, 2023, 42(3): 417-427. [Fang Yelin, Wang Qiuyue, Huang Zhenfang, et al. Spatial and temporal evolution of tourism economic resilience and mechanism of impact in China[J]. Progress in Geography, 2023, 42(3): 417-427.]

[9] 蒋文鑫, 吴军, 徐建刚. 城市生态韧性与经济发展水平耦合协调关系研究——以江苏省为例[J]. 资源开发与市场, 2023, 39(3): 299-308, 318. [Jiang Wenxin, Wu Jun, Xu Jiangang. Study on the coupling coordination between urban ecological resilience and economic development level: Taking Jiangsu Province as an example [J]. Resource Development & Market, 2023, 39(3): 299-308, 318.]

[10] 刘淑淑, 姜霞, 张龙, 等. 长江经济带城市经济韧性测度及时空演化研究[J]. 特区经济, 2021, 389(6): 31-35. [Liu Shushu, Jiang Xia, Zhang Long, et al. Study on the measurement of urban economic resilience and its spatial-temporal evolution in the Yangtze River Economic Belt[J]. Special Zone Economy, 2021, 389(6): 31-35.]

[11] 王世亮, 那仁满都拉, 郭恩亮, 等. 基于熵权-TOPSIS模型的内蒙古城市韧性评价研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2022, 38(1): 17-21. [Wang Shiliang, Narimandula, Guo Enliang, et al. Evaluation of urban resilience in Inner Mongolia based on entropy weight TOPSIS model[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2022, 38(1): 17-21.]

[12] 储金龙, 马昊楠, 李久林. 城市韧性的空间差异与影响因素研究——以安徽省为例[J]. 安徽农业大学学报(社会科学版), 2023, 32(1): 68-76, 125. [Chu Jinlong, Ma Haonan, Li Jiulin. Spatial differences and influencing factors of urban resilience: A case study of Anhui Province[J]. Journal of Anhui Agricultural University (Social Sciences Edition), 2023, 32(1): 68-76, 125.]

[13] 焦柳丹, 王驴文, 张羽, 等. 基于多木桶模型的长三角城市群韧性水平评估研究[J/OL]. 世界地理研究. [2023-05-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.p.20230310.1626.002.html. [Jiao Liudan, Wang Lüwen, Zhang Yu, et al. Resilience assessment of the Yangtze River Delta urban agglomeration based on multi-barrel model[J/OL]. World Regional Studies. [2023-05-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.p.20230310.1626.002.html.]

[14] 吕添贵, 胡晗, 付舒斐, 等. 长三角地区城市生态韧性时空分异特征及影响因素[J]. 地域研究与开发, 2023, 42(1): 54-60. [Lü Tiangui, Hu Han, Fu Shufei, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of urban ecological resilience in the Yangtze River Delta[J]. Areal Research and Development, 2023, 42(1): 54-60.]

[15] 张明斗, 冯晓青. 中国城市韧性度综合评价[J]. 城市问题, 2018, 279(10): 27-36. [Zhang Mingdou, Feng Xiaoqing. Comprehensive evaluation of urban resilience in China[J]. Urban Issues, 2018, 279 (10): 27-36.]

[16] 殷克东, 赵昕, 薛俊波. 基于PSR模型的可持续发展研究[J]. 软科学, 2002(5): 62-66. [Yin Kedong, Zhao Xin, Xue Junbo. A sustainable development research based on PSR model[J]. Soft Science, 2002(5): 62-66.]

[17] 范婧怡. 基于"压力-状态-响应"模型的城市生态环境韧性评价研究——以天津市武清区为例[D]. 天津: 天津大学, 2020. [Fan Jingyi. Study on resilience evaluation of urban ecological environment based on stress-state-response model: Take the Wuqing District of Tianjin as an example[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.]

[18] 杨艳凤, 敬莉. 新疆生态环境与农业经济协调可持续发展的时空演化特征[J]. 河北农业大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 11-24. [Yang Yanfeng, Jing Li. The temporal and spatial evolution characteristics of coordinated and sustainable development of ecological environment and agricultural economy in the Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Journal of Hebei Agricultural University (Social Sciences Edition), 2021, 23(6): 11-24.]

[19] 解星. 资源枯竭型城市社会生态系统韧性评价及提升策略[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. [Xie Xing. The evaluation and promotion strategy of resilience of social ecosystem of resource-exhausted cities[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.]

[20] 夏春红. 新型城镇化语境下城市生态韧性时空演变特征研究——以云南省为例[D]. 昆明: 云南大学, 2020. [Xia Chunhong. Research of spatial-temporal characteristics of urban ecological resilience from perspective of new urbanization: Taking Yunnan Province as the example[D]. Kunming: Yunnan University, 2020.]

[21] 杨亚锋, 王红瑞, 巩书鑫, 等. 可变勾股模糊VIKOR水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 633-646. [Yang Yafeng, Wang Hongrui, Gong Shuxin, et al. Variable Pythagorean fuzzy VIKOR evaluation regulation model of water resources system resilience and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 633-646.]

[22] 孟程程. 中国省级水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2021. [Meng Chengcheng. Evaluation of the development coordination relationship between resilience and efficiency of water resources systems at provincial level in China[D]. Dalin: Liaoning Normal University, 2021.]

[23] 陈丹羽. 基于压力-状态-响应模型的城市韧性评估——以湖北省黄石市为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. [Chen Danyu. Urban resilience assessment based on pressure-state response model: A case study of Huangshi City[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.]

[24] 杨航, 侯景伟, 马彩虹, 等. 黄河上游生态脆弱区复合生态系统韧性时空分异——以宁夏为例[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 303-312. [Yang Hang, Hou Jingwei, Ma Caihong, et al. Spatiotemporal differentiation of the composite ecosystem resilience in the ecologically fragile area in the upper reaches of the Yellow River: A case study in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2023, 40 (2): 303-312.]

[25] 徐伟, 王静爱, 史培军, 等. 中国城市地震灾害危险度评价[J]. 自然灾害学报, 2004(1): 9-15. [Xu Wei, Wang Jing'ai, Shi Peijun, et al. Hazard degree assessment of urban earthquake disaster in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2004(1): 9-15.]

[26] 丁磊, 吕剑平. 基于熵权法测度甘肃省农业经济和农业生态的耦合性[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(3): 151-158. [Ding Lei, Lü Jianping. Measuring the coupling of agricultural economy and agricultural ecology in Gansu Province based on entropy weight

method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(3): 151-158.]

[27] 暴向平, 张学波. 内蒙古经济韧性时空演化与影响因素分析[J]. 资源开发与市场, 2021, 37(9): 1059-1065. [Bao Xiangping, Zhang Xuebo. Analysis on the spatial-temporal evolution and influencing factors of economic resilience in Inner Mongolia[J]. Resource Development & Market, 2021, 37(9): 1059-1065.]

[28] 周海涛, 马钰松, 樊亚宇, 等. 内蒙古红色旅游资源空间分布及可达性分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 814-822. [Zhou Haitao, Ma Yusong, Fan Yayu, et al. Spatial distribution and accessibility analysis of red tourism resources in Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 814-822.]

[29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[30] 李久林, 滕璐, 马昊楠, 等. 安徽省农业经济韧性的空间异质性及其影响因素[J]. 华东经济管理, 2022, 36(11): 75-84. [Li Jiulin, Teng Lu, Ma Haonan, et al. Spatial heterogeneity and influencing factors of agricultural economic resilience in Anhui Province [J]. East China Economic Management, 2022, 36(11): 75-84.]

[31] 胡本田, 李小燕. 加大科技创新投入会减少环境污染吗?[J]. 大连大学学报, 2021, 42(3): 89-100. [Hu Bentian, Li Xiaoyan. Will increasing investment in technological innovation reduce environmental pollution?[J]. Journal of Dalian University, 2021, 42(3): 89-100.]

Spatiotemporal differences and influencing factors of economic and ecological resilience of water resources in Xinjiang based on the PSR model

SUN Yu， LIU Weizhong， SHENG Yang

(College of Economics and Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: This study employs the entropy weight method to determine index weights, utilizing the comprehensive evaluation method and kernel density to assess the spatial and temporal distribution characteristics of pressure-state-response resilience in 14 prefectures within the Xinjiang arid zone of China. In addition, geographic detectors are used to analyze the main influencing factors and factor interactions affecting the economic and ecological resilience of water. The findings reveal the following trends: (1) Stress resilience evaluation indices for Xinjiang prefectures generally decline from 2010 to 2020. Specifically, Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture experiences a shift from high resilience to moderate resilience. Conversely, state resilience, response resilience, and comprehensive resilience exhibit an increasing trend, reflecting an overall improvement in resilience levels. (2) The spatial distribution of pressure-state-response resilience kernel density across all Xinjiang prefectures from 2010 to 2020 displays a staggered pattern, with higher values concentrated in the southwest compared to the northeast. Analyzing the three dimensions reveals a concentrated distribution of high-pressure resilience kernel density moving from the southwest to the central region. Meanwhile, high state resilience and response resilience kernel densities progress from the northeast to the southwest, displaying a more dispersed distribution. Toward the end of the study period, comprehensive resilience, state resilience, and response resilience kernel densities exhibit a decreasing trend, while spatial differences in pressure resilience kernel densities become more pronounced. (3) The influence of industrial structure, GDP per capita, and ecological self-purification capacity on water resources' economic and ecological resilience has intensified, while the impact of man-made disasters and other factors has weakened. Interactions among industrial structure, ecological self-cleaning capacity, and retail sales of social consumer goods are more influential than individual factors in shaping system resilience. Notably, the number of nonlinear enhancement relationships in factor pairs surpasses the number of two-factor enhancements.

Key words: PSR model; kernel density; geographic exploration method; Xinjiang